

ENHANCING THE PERFORMANCE OF THE FUNCTIONS RELATED TO SPECTRUM MANAGEMENT IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

SUMMARY

The problems of the spectrum scarcity, as well as the unbalanced and sporadic usage of the fixed spectrum assignment, have been addressed by a new communication paradigm, called Cognitive Radio (CR). This key enabling technology uses dynamic spectrum access techniques in order to achieve an effective spectrum management paradigm in the licensed bands. In the spectrum management of CR networks, the vacant spectrum bands of primary users (PUs) are opportunistically shared by the CR users. Since PUs have priority to utilize the licensed spectrum, their communication should not be interrupted or interfered by any other user. Therefore, CR users should intelligently sense and determine the ongoing PU activities in a licensed spectrum band to avoid interference with PUs. This concept is also called the *spectrum sensing* function in CR spectrum management paradigm. In spectrum sensing, the PU activities need to be accurately modeled so that CR users can evacuate the band without affecting PU activities. CR users also need to detect spectrum holes to identify transmission opportunities so that the spectrum usage is maximized. Moreover, considering the PU activity, the CR users should decide on the best available spectrum bands for their transmissions. This is the part of the *spectrum decision* function of the spectrum management paradigm in CR networks. It is seen that the spectrum decision, must be organized carefully by considering the challenges in the spectrum availability over time, the short term fluctuations in the availability, and the heterogeneous Quality of Service (QoS) requirements of the CR users. Since CR users should share the available spectrum bands with other CR users without causing harmful interference to the PUs, spectrum management in CR networks should also be designed with effective *spectrum sharing* function. To achieve this function, first, CR users should intelligently monitor and determine the presence of PUs. When CR users managed to detect the spectrum holes to identify transmission opportunities, they should share the available spectrum according to their heterogeneous QoS requirements. Moreover, the assignments of the available spectrum bands should be realized according to the activities of the PUs in the spectrum as well as the throughput requirements of the CR users. Besides, another important point in the spectrum management is that CR users should evacuate the spectrum band when the PU of that band starts using it again. Therefore, a *spectrum mobility* function in the spectrum management is needed in order to organize the spectrum switching issues of the CR network.

This thesis has contributions related to spectrum sensing, decision and sharing functions of the spectrum management paradigm. When working on each contribution, our final aim was to enhance the performance of overall cognitive radio spectrum management system. Our contributions could be itemized briefly as below:

- A novel PU activity model based on the first-difference filter clustering and enhanced with temporal correlation statistics is introduced to analyze and model the spectrum sensing function in CR networks.
- A QoS aware spectrum decision framework is proposed, in which the available spectrum and the heterogeneous QoS requirements of CR users are characterized. This framework is used to model the spectrum decision function in centralized CR networks.
- In order to use the available spectrum as efficient as possible, a cooperative and distributed spectrum decision mechanism is proposed, to model the spectrum decision function in CR ad-hoc networks (CRAHNs).
- A QoS-based spectrum sharing mechanism, where the heterogeneous QoS requirements of CR users are characterized, is proposed to enhance the spectrum sharing function.
- A physical layer-data link layer based cross-layer spectrum assignment for centralized CR networks is proposed to analyze the affects of the cross-layer approaches in spectrum sharing.

Each proposed scheme for the spectrum management functions is evaluated with thorough performance analysis and compared with the existing architectures in the CR network literature.

BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SPEKTRUM YÖNETİMİNE BAĞLI FONKSİYONLARIN BAŞARIMININ ARTTIRILMASI

ÖZET

Günümüzde kablosuz ağ tasarlanırken, resmi birimler tarafından düzenlenen ve kontrol edilen sabit spektrum lisans dağıtım sözleşmeleri dikkate alınır. Bu dağıtılan spektrumun büyük bir kısmı düzensiz bir şekilde kullanıldığından spektrum bantları verimsiz kullanılmaktadır. Yetkili kurumlar tarafından statik olarak dağıtılmış olan spektrumun kullanımını dinamik hale getirerek kullanımındaki verimsizliğin giderilmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, Bilişsel Radyo adı verilen teknoloji ile, kablosuz kullanıcılarla değişik frekanslarda dinamik olarak çalışma olanağı tanınmaktadır. Bilişsel radyolar dinamik spektrum erişim teknikleri ile bu sorunları çözmek için önerilmiş bir teknolojidir. Bu teknoloji temeliyle oluşturulan ağlara Bilişsel Radyo Ağları denmektedir, bu ağın kullanıcılarına, seyrek kullanılan lisanslı frekanslar arasında geçiş yaptırılarak, iletişim olanağı verilmektedir. Bilişsel Radyo Ağlarında oluşturulan spektrum yönetimi, spektrumu kullanma hakkına sahip birincil kullanıcılarla engel olmadan, elverişli spektrum bandlarının bulunması ve bunun ikincil kullanıcılar arasında paylaşılması olarak tanımlanabilir. Bilişsel ağ kullanıcısına sağlanan bu dinamik özellik, frekansın lisanslı gerçek kullanıcııyla girişim yapmaması koşuluyla verilmektedir. Böylece bilişsel radyo ağı kullanıcıları, lisanslı kullanıcıların sahip olduğu frekansı seyrek kullanmasından faydalananarak, o frekansta iletişime geçmektedir. Lisanslı kullanıcının sahip olduğu bu frekansa geri dönmesi halinde, bilişsel kullanıcılar frekansı boşaltmakla ve lisanslı kullanıcıyla girişime geçmemekle yükümlüdürler. Buradaki elverişli spektrum bandları, değişik spektrum sezme teknikleriyle belirlenir. Elverişli spektrum sadece hattın zaman değişim karakteristiklerinden değil, birincil kullanıcıların spektrumu kullanma aktivitelerine göre değişiklik gösterir. İkincil kullanıcılar (Bilişsel ağ kullanıcıları) için elverişli spektruma erişim teknikleri, bilişsel radyonun en uygun spektrum bandını seçmesine olanak sağlamaktadır. Bunun yapılabilmesi için gerçekleştirilen fonksiyonlardan biri *Spektrum Sezme*'dir. Burada, kullanılmayan spektrum bandlarının saptanabilmesi ve bu bandların, birincil kullanıcıların iletişimine engel olabilecek çakışmalara sebep olmadan ikincil kullanıcılarla paylaşılabilmesi esas alındır. Bir diğer fonksiyon, *Spektruma Karar Verme*'dir. Bu fonksiyon, bilişsel ağ kullanıcıları tarafından sezilen birden fazla spektrum boşluğu varsa bunlardan en uygun olanının bilişsel ağ kullanıcılarının istediği servis kalitesine göre kullanımına karar verilmesidir. Bir diğer temel fonksiyon olan *Spektrum Paylaşma*, birincil kullanıcıların iletişimini etkilemeden aynı spektrum bandını kullanan ikincil kullanıcılar arasında hem adil hem de yüksek debili bir paylaşım sağlanabilmesidir. Tanımlabilecek başka bir işlev olan *Spektrum Hareketliliği* işlevi, ikincil kullanıcıların spektrumun gerçek sahibi geldiğinde spektrumunu değiştirebilmesidir.

Bilişsel ağlarda spektrum yönetimini oluşturan spektrum sezme, spektruma karar verme ve spektrum paylaşımı işlevlerinde çözülmesi ve iyileştirilmesi gereken birçok sorun bulunmaktadır. Bu bağlamda, bu tezde, bu üç fonksiyon ayrı ayrı incelenmektedir:

- *Spektrum sezilme* fonksiyonu sırasındaki etkinliği artırmak amacıyla yeni bir birincil kullanıcı modellemesi ihtiyacı oluşturulmuştur. Tasarlanan yeni modelde, birincil kullanıcı aktivitelerinin kısa süreli salınımlarının sezilmesi ve modellenmesi bir kümeleme algoritması tasarılanarak gerçekleştirilmiş, elverişli spektrum boşluklarının matematiksel olarak modellenmesi ise, aktivite datasının korelasyon bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.
- İkincil kullanıcılar için bir *spectruma kara verme* yapısı modellenmiş, bu modelde hem birincil kullanıcı aktivitelerinin kısa zamanlı değişimleri, hem de ikincil kullanıcıların servis kalite istekleri göz önüne alınmıştır.
- Bilişsel tasarsız ağlar için, ağdaki diğer bilişsel kullanıcıların bilgilerinin de kullanıldığı müşterek ve dağıtık bir spektruma karar verme yapısı tasarlanmıştır.
- İkincil kullanıcıların servis istekleri ve birincil kullanıcıların kısa zamanlı spektrum kullanımındaki değişimler dikkate alınarak bir *spektrum paylaşım* yapısı tasarlanmıştır ve modellenmiştir.
- Hem birinci (fiziksel) hem de ikinci (veri bağlı) katmanlarındaki bilgiler modellenerek bir çapraz katman yapısı oluşturulmuştur.

Tezde tasarlanan tüm modeller geniş bir başarım incelemesiyle, literatürdeki güncel bilişsel ağ çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır.